

기후변화 적응을 위한 최적 그린 인프라 배치 시나리오: NSGA-II 알고리즘 기반 의사결정 지원 모델

장새연* · 김신우** · 윤은주*** · 김상혁** · 김다슬**** · 이나겸* · 이동근*****†

*서울대학교 농업생명과학대학 조경·지역시스템 공학부 석사과정, **서울대학교 협동과정 조경학 박사과정,
국토연구원 도시연구본부 도시정책·환경연구센터 부연구위원, *서울대학교 농업생명과학대학 조경·지역시스템 공학부 박사과정,
*****서울대학교 농업생명과학대학 조경·지역시스템 공학부 조경학과 교수 / 서울대학교 농업생명과학연구원 지역개발·조경연구소 겸무연구원

Optimal green infrastructure deployment scenarios for climate change adaptation: A decision support model based on Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II)

Jang, Sae Yeon* · Kim, Shinwoo** · Yoon, Eun Joo*** · Kim, Sanghyuck** · Kim, Da-seul**** · Lee, Na Gyeom* and Lee, Dong Kun*****†

*Master's Student, Dept of Landscape Architecture and Rural Systems Engineering, College of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul, Korea

**Ph.D. Student, Interdisciplinary Program in Landscape Architecture, Seoul National University, Seoul, Korea

***Associate Research Fellow, Urban Research Division, Korea Research Institute for Human Settlements, Sejong, Korea

****Ph.D. Student, Dept of Landscape Architecture and Rural Systems Engineering, College of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul, Korea

*****Professor, Dept of Landscape Architecture and Rural Systems Engineering, College of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul, Korea / Adjunct Researcher, Institute of Regional Planning and Landscape Architecture, Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul, Korea

ABSTRACT

Global temperature increases due to climate change are intensifying heat-related impacts, particularly in densely populated urban areas. Seoul, Korea, has experienced steady increases in summer temperatures since the 1950s, with more than 30 days of extreme heat recorded in 2018. In response to these challenges, green infrastructure (GI) strategies are increasingly recognized as effective long-term adaptations capable of mitigating urban heat through shading, evapotranspiration, and enhanced surface albedo. While GI's potential for reducing temperatures is well-documented, most prior research has focused on spatial optimization, overlooking the importance of timing and associated maintenance costs. In this study, we address these gaps by optimizing both the spatial and temporal implementation of GI technologies, such as street trees, green roofs, and greenways, for the period from 2030 to 2050. Using RCP 4.5 climate projections and the Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II), we consider the effects of rising temperatures and the financial costs of GI installation and upkeep. Our findings suggest that establishment of GI areas greater than 49% of the total considered area by 2040 will allow the greatest temperature reduction, particularly through the early introduction of street trees. The rate of GI increase in the later period (2040~2050) depends on scenario, with variation in the effectiveness of specific technologies. This research provides crucial insights for efficient resource allocation in urban climate adaptation by integrating spatial and temporal factors. We emphasize the importance of early GI investment and offer a robust framework for decision-makers to plan long-term, cost-effective strategies that address the escalating challenges of urban heat.

Key words : Green Infrastructure Scenario, Optimization, Decision-Making Support, Climate Change Adaptation

†Corresponding author : dklee7@snu.ac.kr (Room 9211, Bldg. 200, 1, Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 08826, Korea. Tel. +82-2-880-4885) ORCID 장새연 0009-0008-9072-0752 김다슬 0000-0003-3747-2338
김신우 0000-0002-3964-0502 이나겸 0009-0006-2117-9638
윤은주 0000-0002-6531-206X 이동근 0000-0001-7678-2203
김상혁 0000-0002-0784-8384

Received: August 20, 2024 / Revised: September 23, 2024 1st, October 30, 2024 2nd / Accepted: December 6, 2024

1. 서론

기후변화로 전 지구적으로 평균 기온이 상승하여, 인구와 인프라가 밀집된 도시에서 그 피해가 가중된다(Tomlinson et al., 2011; Yang et al., 2016). 한국의 서울은 1950년을 기점으로 지속적으로 여름철 최고 기온이 증가하고 있는 추세를 보이고 있으며, 2018년에는 폭염 일수가 30일을 초과하여 역대 최대의 폭염 일수를 경신하였다(KMA, 2024). 전국에서는 2023년 7월 29일 1일 동안 온열 질환 추정 사망자가 7명 발생하였다(KDCA, 2023).

이러한 피해를 줄이기 위해, 그린 인프라가 장기적 관점의 기후변화 적응을 고려한 대책으로서 강조되고 있다. Sharifi (2021)는 기후변화 적응과 완화의 공편익(co-benefit)을 얻는 데 그린 인프라가 상대적으로 높은 잠재력을 가졌음을 시사하였다. 그린 인프라는 그림자, 증발산 효과, 알베도 증가의 관점에서 기온을 감소시킬 수 있으며(Zölch et al., 2016), 장기적으로 그 효과가 유지되고 복합적인 재해에 대응이 가능하다는 장점 또한 존재한다. 도시 내 불투수면으로 이루어진 도로 및 빌딩 등을 옥상 녹화와 같은 투수면적으로 바꿈으로써 폭염뿐 아니라 홍수에도 대응할 수 있다(Green et al., 2021; Huang et al., 2020).

폭염 문제 해결을 위한 그린 인프라 도입에 있어 주요하게 고려되는 특징은 도입 위치에 따라 효과가 달라진다는 점이다(Fu et al., 2022). 이와 더불어 최근 연구에서는 효과의 지속성을 위한 식생 관리의 중요성이 강조되며 유지, 관리비까지 고려하는 것이 중요하게 여겨지고 있다. 이러한 두 가지 특성을 고려하여 그린 인프라 계획이 수립되어야 하나, 대부분 선행연구의 경우 그린 인프라의 공간적 배치, 즉 도입 위치만을 고려하는 데 그치고 있다. Chen et al. (2020)은 ‘mid-rise’와 ‘low-rise’ 건물 구역에서 나무의 수량을 60%까지 증가시키는 것이 보행자 범위의 기온 저감에 효과가 있다고 밝혔다. Yoon et al. (2019)은 나무와 초지류 두 가지의 그린 인프라가 기온 저감 효과와 연결성의 측면에서 최대의 효과를 가지면서 최소의 비용을 만족하는 공간 계획을 도출하였다. Kim et al. (2023)은 비용 대비 주거 단지의 열 환경을 최대한 개선시킬 수 있는 나무의 최적 배치를 제안하였다.

대부분 선행 연구는 비용 대비 최적의 효과를 내는 ‘위치’를 찾아내고 있으나, 그린 인프라의 유지 및 관리 비용을 고려한 ‘시간’적인 부분에 대해서는 고려되지 않고 있다. 해마다 사용 가능한 예산은 한정되어 있기에 모든 그

린 인프라 기술을 동일 시점에 한 번에 설치할 수는 없다. 그린 인프라의 설치 시점에 따라 유지 및 관리 비용이 다르게 나타날 것이므로, 설치 시점을 고려함으로써 기존의 선행연구의 결과들이 달라질 수 있다. Montalto et al. (2013)은 그린 인프라를 초기에 다량의 그린 인프라를 설치하는 시나리오와 점진적으로 수량을 증가시켜 가는 시나리오 사이에 물리적, 사회적으로 효과 차이가 있음을 나타냈다. 또한 기후변화는 시간에 의해 유동적으로 발생하는 현상이므로, 적응 수단으로서 그린 인프라의 계획 또한 시간적 관점에서의 고려가 필요하다. Wang et al. (2023)은 장기적 관점에서 변동성이 있는 기후변화 시나리오를 접목시켜 그린 및 그레이 인프라의 최적화를 수행한 결과 기존 시스템에 비해 비용 및 유출량 저감에 이점이 있음을 시사하였다. 선행 연구들은 그린 인프라의 시간적 측면을 모두 강우 사건에 대한 유출량의 관점에서 고려했으나, 기온과 관련되는 폭염 등의 재난에 대해서도 고려될 필요가 있다. 따라서 기후변화 시나리오 및 그린 인프라의 설치, 유지, 관리비를 고려했을 때, 최적의 기온 저감 효과를 위해 어떤 시점에 어떤 기술이 우선적으로 배치되어야 하는지에 대한 의사결정 지원 연구가 필요한 실정이다.

이에 본 연구에서는 그린 인프라의 유지 및 관리 비용이 포함된 최적화를 2030년부터 2050년까지 10년 단위로 수행하여, 2030~2040년, 2040~2050년의 각 시간단위에서 그린 인프라 기술들의 최적 수량 계획안을 도출하였다. 도출된 수량이 공간적으로는 어떻게 배치되어야 하는지를 나타내는 공간 계획안까지 제시함으로써, 시간적인 측면과 공간적인 측면 양쪽에서 그린 인프라 계획에 기여하고자 하였다. 본 연구는 그린 인프라 계획이 수립될 예정인 신규 조성지들의 도시 계획에 도움을 줄 수 있을 것이다. 동일한 예산을 더 효율적으로 사용하기 위한 장기적 의사결정 지원에 있어, 그린 인프라 계획의 공간적인 측면이 강조되어 온 기존 선행 연구들에서 시간적 측면으로의 확장될 가능성을 시사한다.

2. 방법론

2.1. 입력 데이터, 모델 변수의 설정

기온 평년값, 기온 상승률, 기후변화 시나리오, 제약 조건 값은 의사결정자의 필요에 따라 변경 가능한 값으로, 시공간적 계획안을 제안하는 의사결정 지원 모델의 결과

를 시범적으로 보여줄 수 있도록 임의로 설정하였다. 기온 평년값은 기상청 기후정보포털(<http://www.climate.go.kr/home/>) 관측정보에서 1991년부터 2020년까지의 전국 여름 최고기온 평균값을 선택하였고 그 값은 28.2°C이다. 평년값을 기준으로 기온의 상승률을 RCP 시나리오로 반영하였다. 상승률 값으로는 전국 최고기온 평년편차값을 사용하였고, 결과 도출에는 RCP 4.5 시나리오를 사용하였다. 2030~2040년 계획안부터 2040~2050년 계획안의 실행까지 사용 가능한 총 예산은 현재 화폐 가치 기준으로 20년 간 총 231억 원으로 제약 조건을 확정하였다.

2.2. 그린 인프라 종류

의사결정 지원의 대상이 되는 그린 인프라 종류는 옥상 녹화, 가로수, 띠녹지이다. 이들 기술은 지면과 옥상을 포함한 옥외 활동 공간에 설치 가능하며 기온 저감 효과를 가지므로, 대상 기술로서 선정되었다. 가로수의 구체적인 수종 및 규격은 서울특별시 가로수 조성 및 관리 조례, 가로수 조성·관리 매뉴얼을, 띠녹지의 수종은 한국잔디관리 가이드북을 참고하여 선정하였다(Table 1). 옥상녹화는 생태적 기능의 회복을 우선으로 하는 경량형 녹화와 휴식

공간으로의 이용을 목표로 하는 중량형 녹화로 나뉘며, 각 기준에 맞게 적절히 혼합하여 조성하는 혼합형 녹화도 있다(Seoul Metropolitan Government, 2017). 중량형 녹화는 설치에 있어 깊은 토심을 필요로 하며 하중이 높기 때문에(Kwon et al., 2014) 설치 가능한 건축물이 한정될 수 있다. 이에 본 연구에서는 경량형 녹화와 중량형 녹화를 상황에 따라 혼합 가능한 혼합형 녹화를 선정하여, 그린 인프라의 신규 조성을 목표로 하는 다양한 계획에 유연하게 적용될 수 있도록 하였다.

2.3. 대상지

의사결정 지원 모델의 예시 결과를 구현하기 위해, 네이버 지도 측량 서비스 및 S-Map (Virtual Seoul) 시스템을 이용하여 강남구 대치4동 선릉역 근처의 한 블록을 단순화하여 대상지로 구현하였다. 강남구는 과거 ‘토지구획정리 사업(1968, 1971년)’이 계획된 구로 격자 모형이 반듯한 형태를 띠며 고층 건물이 밀집하여, 그린 인프라의 신규 조성이 필요한 계획도시의 모습을 잘 대표할 것으로 판단하였다(Fig. 1). 서울시 유니버설 디자인 적용지침 및 가로수 조성 및 관리 조례에 따라 가로수 식재 공간을 지정하

Table 1. Species and specifications according to types of green infrastructure

Type of green infrastructure	Species	Standard	Reference
Street trees	Zelkova tree	Height 4.0 m; Diameter at root collar 12 cm	KFS (2020), Seoul Metropolitan Government Ordinance on the Creation and Management of Street Trees
Semi-intensive green roofs	Ground cover plants, small shrubs	Soil depth of 30 cm or less; Per unit area (m ²)	Kwon et al. (2014)
Green way	Urban turfgrass	Per unit area (m ²)	NIFoS (2022)

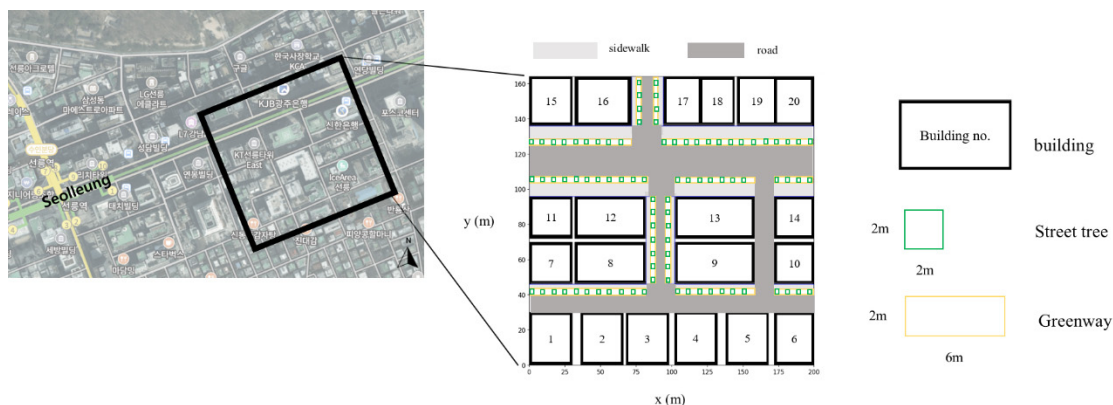


Fig. 1. Stylized study site (200 m × 164 m). Grid unit is 2 m.

Table 2. Information of buildings in the study site

Building no.	Roof Area (m ²)	Height (m)	Building no.	Roof Area (m ²)	Height (m)
1	900	17	11	720	75
2	900	9	12	1200	72
3	900	12	13	1344	83
4	900	12	14	672	90
5	900	20	15	840	67
6	840	25	16	1120	99
7	720	37	17	840	81
8	1200	81	18	560	94
9	1344	30	19	560	62
10	672	32	20	952	75

였고, 띠녹지는 가로 공간 전체에 설치 가능하다고 가정하였다. 옥상녹화는 가상공간 내의 모든 건물 옥상에 설치될 수 있다고 가정하였다. 옥상 녹화가 설치 가능한 대상지 건물의 옥상 넓이는 대략 500~1400 m² 사이의 값을 가졌고, 높이는 9~100 m 사이의 값을 가졌다(Table 2).

2.4. 최적의 공간 설계를 위한 도구

본 연구에서는 해당 테스트 공간 내 최적의 그린 인프라 시나리오를 구성하기 위해 'NSGA-II'의 최적화 알고리즘을 사용했다. 이는 대표적인 다목적 최적화 알고리즘으로, 2개 이상의 상충하는 목표 중에서 최상의 절충안이 되는 최적해들을 모아 '파레토 프론트(Pareto front)'를 만드는 것을 목표로 한다(Ham and Jang, 2023). 생물의 유전 과정을 본떠, 이전 세대의 최적해 후보들끼리의 교체 및 변이를 통해 수많은 최적해 후보를 생성하고 이들을 비지배 정렬(non-dominated sorting)함으로써 현재 세대의 최적해 후보들이 생성된다. 이 과정이 반복되면서 세대를 거칠수록 파레토 프론트에 가까운 최적해 후보들이 만들어진다. NSGA-II는 최적해 후보들 사이의 다양성을 확보하면서도 파레토 프론트에 수렴하는 최적해 후보를 빠르게 만들 수 있는 특성을 가진다(Deb et al., 2002). 본 연구에서는 NSGA-II를 사용하여 그린 인프라에 의한 기온 감소 효과를 최대로 하며 비용은 최소로 하는 두 가지 목적을 절충하는 옥상녹화, 띠녹지, 가로수의 최적 위치 및 수량을 확정하였다. 국토교통부 조경기준 행정규칙에서 조경면적의 100분의 50 이상을 식재의무 면적으로 정하고 있어, 옥상녹화는 건물마다 설치 면적 비율을 50%에서 100%까지 10% 단위로 결정할 수 있게 설정하였다. 가로수와 띠녹지는 설치 가능 지역에서 0% 혹은 100%로 설

치 여부를 결정할 수 있다.

2.4.1. 기온 저감 효과의 평가

도시 내에 설치되는 그린 인프라들의 기온 저감 효과는 다양한 선행 연구들에서 확인되었다(Carvalho et al., 2017; Marando et al., 2019; Varentsov et al., 2023). 본 연구의 최적화 모형에서는 다양한 환경의 그린 인프라 신규 조성지에 적용되는 계획을 목표로 하며, 전반적인 '옥외 공간'을 포함한 도시 캐노피 층(Urban canopy layer) 내에서의 기온 저감 효과를 상정하고 있다. 따라서 180여 건의 연구 리뷰를 통해 건물 바깥 및 지면에서의 평균적인 녹화 효과를 도출한 Wong et al. (2021)의 결과가 범용성 있게 적용 가능할 것으로 판단하였다.

Wong et al. (2021)에 의하면 지면 녹지의 증발산 과정 및 알베도 증가에 의한 기온 저감 효과는 평균적으로 약 2~4°C이다. 낮 시간 동안 나무는 증발산 과정뿐 아니라 그림자에 의한 기온 저감 효과를 발생시키므로 잔디만을 식재할 때에 비해 높은 저감 효과를 갖는다(Amani-Beni et al., 2018; Ng et al., 2012). 따라서 잔디가 식재되는 띠녹지의 기온 저감 효과는 Wong et al. (2021)에서 규정한 범위의 최솟값인 2°C, 가로수의 기온 저감 효과는 해당 범위의 최댓값인 4°C로 가정하였다. 본 연구와 유사하게 NSGA-II 알고리즘을 이용하여 나무의 공간 최적화를 다룬 Kim et al. (2023)은 나무에 의한 증발산 효과가 주변 그리드에 영향을 미치는 것으로 가정하였다. Yoon et al. (2019) 또한 나무와 초지류의 공간 최적화에서 나무가 인접 그리드에 미치는 저감 효과를 고려하였다. 이에 본 연구에서도 가로수의 인접 그리드에 증발산으로 인한 기온 저감 효과를 가정하였고, 그 값은 Wong et al. (2021)에서

규정한 기온 저감 범위의 최솟값인 2°C로 가정하였다. 또한 같은 가로 공간에 설치 가능한 가로수와 띠녹지는, 녹지 인접에 의한 시너지 효과가 발생하므로(Lin and Lin, 2016; Lin et al., 2015), 인접 그리드에서는 각 기술의 저감 효과를 합산한 값만큼 저감이 발생한다고 가정하였다(Table 3, Fig. 2a).

Wong et al. (2021)에서 옥상녹화의 경우 세덤류를 식재한 옥상녹화에서 2°C 이하의 저감이 발생하며, 식재료 선택에 따라 최고 기온을 4.5°C까지 저감 가능하였다. 이에 본 연구에서는 옥상녹화에 대해 두 값의 평균인 3.25°C만큼의 저감 효과를 가정하였다(Table 3, Fig. 2b).

대상지에 그린 인프라 기술을 배치하기 이전 기온값이 존재할 때, 대상지에 기술을 배치함으로써 이후 대상지 격자마다의 기온 값이 이전과 달라질 것이다. 이때 대상지 격자의 기술 배치 이후 모든 격자(200 m × 164 m)의 기온값의 평균을 계산하여(Eq. (1)), 이 값을 최소화하는

것을 최적화의 첫 번째 목적으로 한다(Eq. (2)).

$$total T_{aft} = \frac{\sum_{grid} T_{aft}}{no.of grid}, \quad (1)$$

$$1st Obj. = Minimize(total T_{aft}). \quad (2)$$

(ini: initial, aft: be installed)

2.4.2. 비용의 평가

그린 인프라 기술의 설치비와 유지비를 함께 고려하여, 미래 그린 인프라 식재 시 해당 연도의 비용과 이를 지속하는 데 드는 일정기간(예, 10년간) 유지비를 포함하였다. 띠녹지, 가로수의 설치비 및 유지비는 한국토지주택공사의 수목·잔디 일위대가, 유지관리비 자료를 참고하여 산

Table 3. Methods for assessing temperature based on types of green infrastructure in each grid

	T_{aft} : Temperature after installation (°C)		Note
Street trees	Installation grid	$T_{ini} - 4.00$	Synergy effect when overlapped: $T_{aft} = T_{ini} - 4.00$
	Adjacent grid	$T_{ini} - 2.00$	
Green way	$T_{ini} - 2.00$		
Green roofs	$T_{ini} - 3.25$		

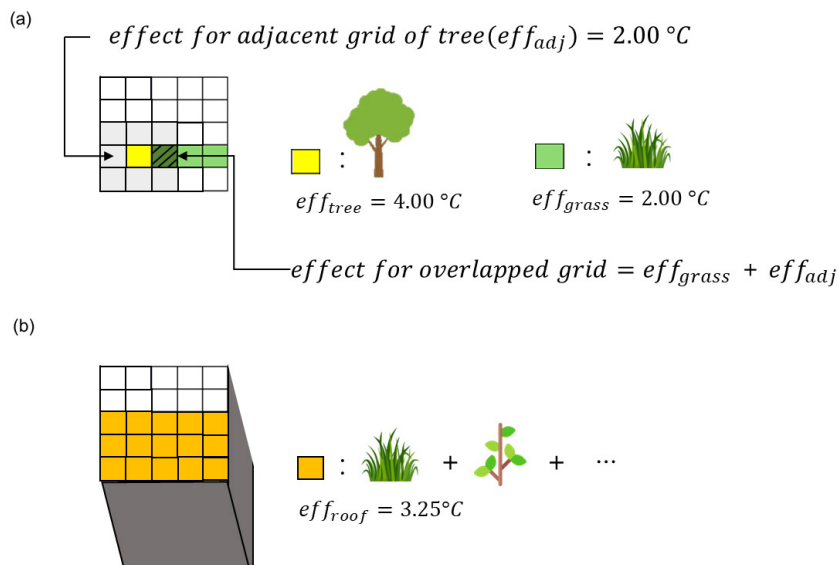


Fig. 2. Schematic diagram depicting the effects of green infrastructure by grid (a) on the ground, and (b) on the building

정하였다. 유지비에는 병충해 관리, 가지치기, 관수 비용 등이 포함되어 있으며 1년 동안의 횟수는 산림청 및 국립산림과학원의 가이드를 반영하였다. 옥상녹화의 경우, 옥상녹화 및 벽면녹화 연구 120여 편을 리뷰한 Manso et al. (2021)에서 산정한 혼합형 옥상녹화의 평균적인 설치 및 유지 비용을 반영하였다(Table 4).

미래의 계획안을 만들에 있어 비용의 현실성을 고려하기 위해, 원자재 비용과 최저임금 변화율을 반영하여 그린 인프라 기술의 설치비 및 유지비가 상승하도록 하였다. 설치비 및 유지비의 가격 상승률은 모두 10년 단위의 상승률 값으로 계산되었으며 각 기술에 대한 비용 구성 요소의 차이를 반영하였다(Table 5). 가로수 설치비는 50% 이상이 원자재 비용이므로, 상승률 값으로 가로수 설치비의 연간 원자재 상승률의 평균(KREI, 2014~2023) 값을 활용하였다. 옥상녹화 설치비의 상승률은 기타 건설 항목에 해당하는 건설공사비지수 값의 10년 평균 상승률로 산정하였다. 띠녹지 설치비 및 모든 기술의 유지비는 50% 이상이 인건비 비용이므로 최저임금의 10년 평균 상승률로 계산하였다(Minimum Wage Commission, 1994~2023년).

또한, IPCC AR6에서는 미래 경로를 고려함에 있어 3~8%의 할인율을 사용하고 있다. 본 연구에서도 물가상승률을 반영한 화폐가치의 하락을 반영하기 위해 사회적 할인율 4.5%를 도입하여 산정하였다(Table 6)

대상지에 그린 인프라 기술을 배치했을 때 발생하는 설치비와 유지비를 합산한 값을 ‘비용’으로 정의하여(Eq.

(3), Eq. (4), Eq. (5)), ‘비용’값을 최소화하는 것을 최적화의 두 번째 목적으로 설정하였다(Eq. (6)).

$$cost_{inst}(n,j) = initial\ cost_{inst}(j) \times area(j) \times Inflation\ constant_{inst}(j)^{n/10} \times (1 + discount\ rate)^n, \tag{3}$$

$$cost_{main}(n,j) = n \times Initial\ cost_{main}(j) \times area(j) \times Inflation\ constant_{main}(j)^{n/10} \times (1 + discount\ rate)^n, \tag{4}$$

$$total\ cost(n) = \sum_{j=1}^3 (cost_{inst}(n,j) + cost_{main}(n,j)), \tag{5}$$

$$2nd\ Obj. = Minimize(total\ cost(n)). \tag{6}$$

(When $n = \begin{cases} 10 & \text{for 2030 year} \\ 20 & \text{for 2040 year} \end{cases}$, $j = \text{types of Green}$

Infrastructure: green roof, greenway, street tree, inst: installation, main: maintenance).

2.5. 최적의 그린 인프라 시나리오

앞서 정의한 기온 저감 효과를 최대로 하고 비용을 최소로 하는 최적화를 두 번 반복하여, 2030~2040년과

Table 4. Initial costs of green infrastructures

Initial cost	Installation (₩m ⁻²)	Maintenance (₩m ⁻² year ⁻¹)	Reference
Green roofs	190,190	11,368	Manso et al. (2021)
Green way	10,892	1,379	Korea Land and Housing Corporation
Street trees	101,545	13,029	

Table 5. Inflation constants of green infrastructures

Inflation constant	Installation	Maintenance	Reference
Green roofs	1.44	2.19	KICT (2024), MWC (2023)
Green way	2.19	2.19	MWC (2023)
Street trees	2.84	2.19	KREI (2023), MWC (2023)

Table 6. Discount rates of green infrastructures

Discount rate	Reference
Social discount rate 4.5%	IPCC (2022), General guidelines for conducting preliminary feasibility studies

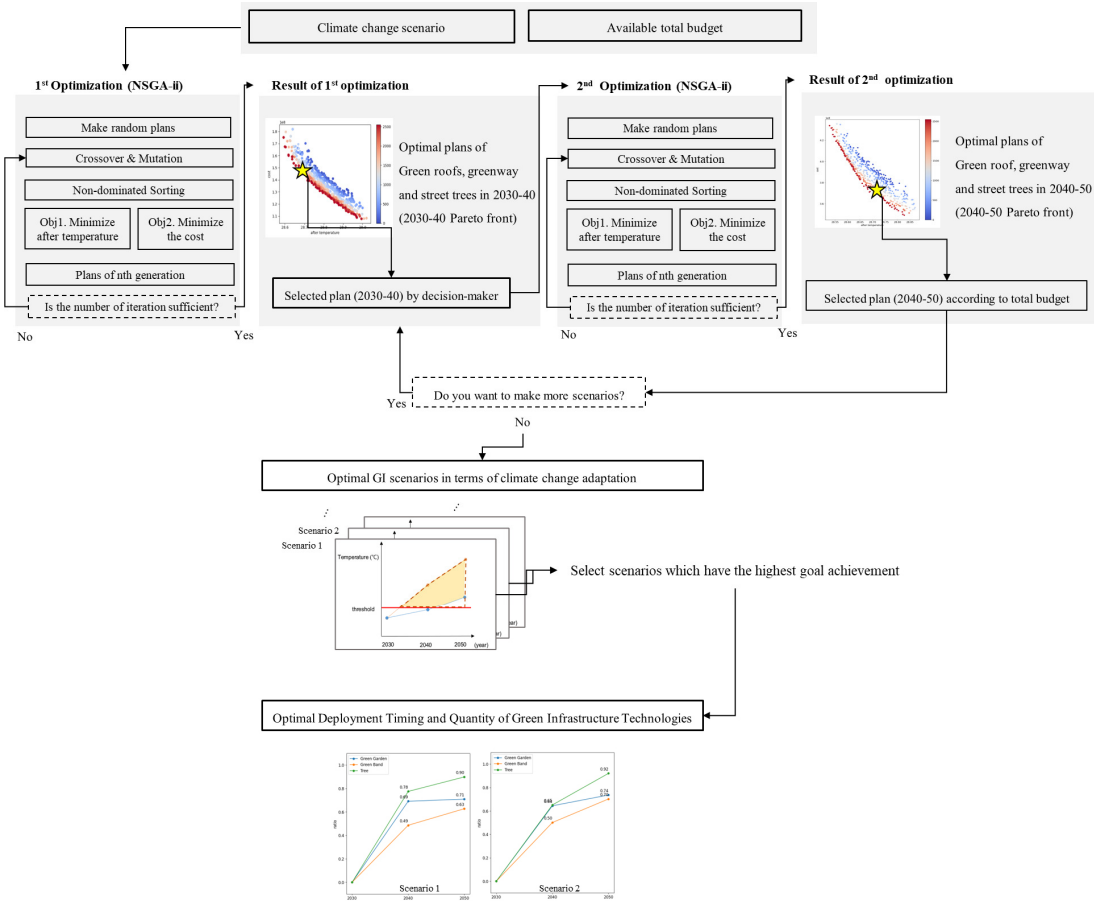


Fig. 3. Flow chart of decision-making support model for deployment timing and quantity of GI

2040 ~ 2050년 각각의 계획안을 도출한다. 2030 ~ 2040년에 선택된 안의 비용에 따라 2040 ~ 2050년의 안은 해당 기간의 파레토 프론트에서 자동으로 선택됨으로써 하나의 시나리오가 완성된다. 의사결정자는 여러 번의 선택을 반복하여 20년간 같은 비용을 사용하는 다양한 그린 인프라 시나리오들을 만들 수 있다. 이때 의사결정자가 입력한 비용의 조건에 만족되지 않는 시나리오들은 기각된다. 이후 비용 조건을 만족하는 시나리오 가운데 기후변화 적응에 가장 유리한 시나리오들이 최종적으로 선별되어, 해당 시나리오들을 구성하는 그린 인프라의 시간적 배열이 최적의 시간 계획안으로 선정된다(Fig. 3).

따라서 최적 시간 계획안의 도출을 위해, 기후변화 적응 능력에 대한 개별 시나리오들의 평가가 수행되어야 한다. 평가 방법으로서 해당 시나리오의 계획안을 시행했을 때 예상되는 2050년까지의 기온이 계획안을 시행하지 않았을 때에 비해 얼마나 저감되었는지를 시간에 따라 적분

하여 계산한다. 이때 저감의 목표 지점을 ‘임계값’으로 지정한다. 임계값은 폭염의 관점에서 기온이나 열 지수 등이 온열 질환자 등과 이루는 관계를 분석했을 때 열 관련 건강 리스크가 급증하기 시작하는 값으로 국내외에서 관련 연구가 진행되었다(Beckmann et al., 2021; Kim et al., 2024; Liu et al., 2018). 본 연구에서 기온 저감 목표가 되는 임계값은 29°C로 설정하였다(McLean et al., 2018). 임계값의 개념에 따라 시나리오 평가 시 임계값까지의 저감 효과만이 ‘유의미’하다고 가정하여, 계획안 적용 이전의 기온 값에서 계획 적용 이후의 기온 값까지의 면적을 시나리오별로 도출하였다. 계획안 적용 이전의 기온값에서 임계값까지의 면적은 시나리오별 면적이 가질 수 있는 최댓값이므로, 이를 목표 면적으로 설정하여 최종적으로 시나리오별 면적을 목표 면적으로 나눠서 그 값을 목표 달성률로 설정하였다(Fig. 4). 목표 달성률이 높을수록 계획안 적용 이전에 비해 이후에 임계값까지 저감된 정도가

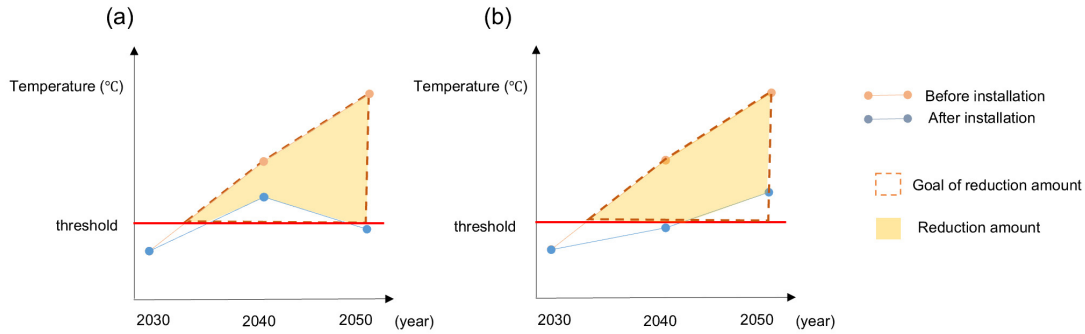


Fig. 4. Schematic of goal achievement rate calculation through reduction area to the threshold

크며, 폭염으로 인한 피해에 시스템이 대처하기 쉬워지므로 기후변화 적응 역량이 높다고 할 수 있다. 그러므로 목표 달성률이 가장 높은 시나리오가 기후변화 적응 역량이 가장 높은 시나리오로서 의사결정자에게 최적 그린 인프라 시나리오로 제시된다. 의사결정자는 일련의 과정을 통해 결정된 최적 시나리오를 확인함으로써 그린 인프라 기술의 장기적 시간 계획안을 수립할 수 있다.

3. 결과 및 토의

3.1. 비용 조건에 따라 도출된 그린 인프라 시나리오

의사 결정자가 2030~2040년(첫 번째 기간)의 파레토 프론트(Fig. 5)에서 비용 상위 10%~90%까지 10% 분위 수 단위로 총 9개의 해를 선택한다고 가정하였다. 각각의

해에서 2040~2050년(두 번째 기간)에 대한 최적화를 진행하여 비용 제약 조건(20년간 총 231억 원 사용)을 만족하는 해만이 그린 인프라 시나리오를 구성할 수 있다. 상위 10%, 20% 분위수 해들은 첫 번째 기간에 그린 인프라를 과다 설치하여 유지 및 관리비를 감당할 수 없기 때문에 그린 인프라 시나리오를 구성하지 못하였다. 상위 80%, 90% 분위수 해들은 첫 번째 기간에 그린 인프라를 과소 설치하여 원하는 비용을 전부 소모할 수 없기에 그린 인프라 시나리오에서 탈락하였다. 따라서 의사결정자에게 제시되는 해는 상위 30~70% 분위수의 해이며, 이들은 모두 2030~2050년 기간에 동일한 비용을 사용한다.

첫 번째 기간에 상위 30~70% 분위수 비용을 갖는 해들을 시작 조건으로 두 번째 기간에 최적화를 수행하여 도출된 파레토 프론트들은, 분위수에 따라 비용 및 효과의 분포가 달라지는 양상을 보였다(Fig. 6). 낮은 분위수를

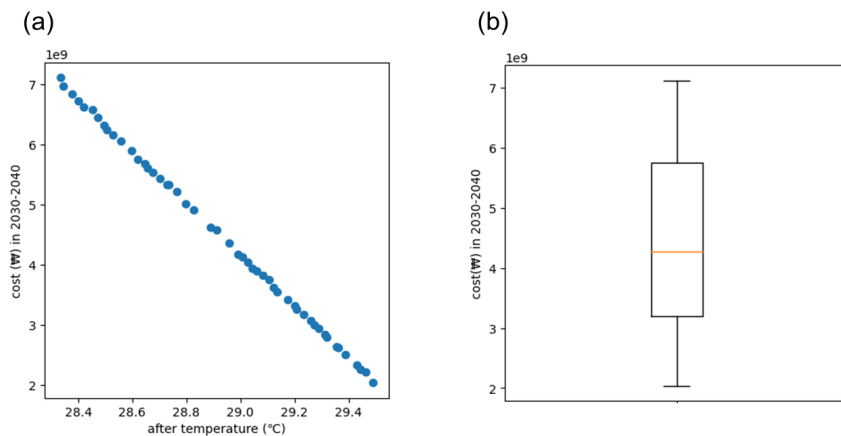


Fig. 5. (a) Pareto front and (b) box plot indicating cost distribution for optimization in 2030~2040. Centered line in the box indicates the median.

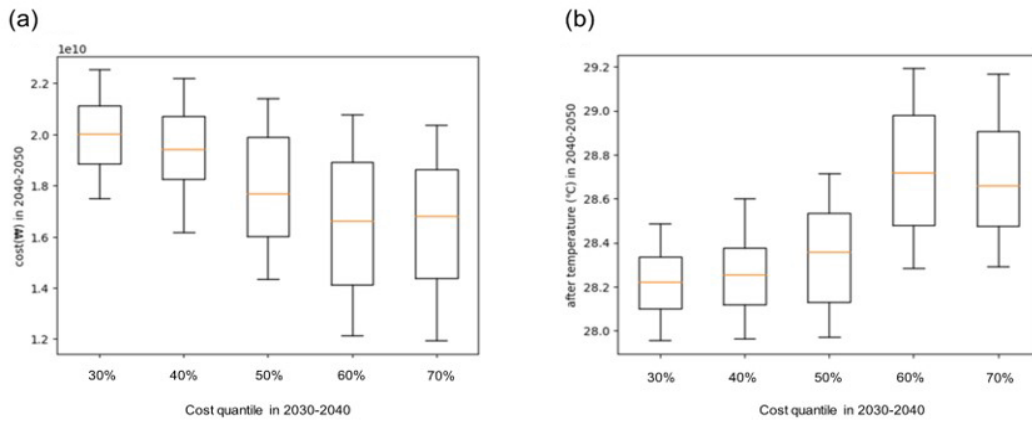


Fig. 6. Box plots indicating (a) cost and (b) after temperature distribution for optimization in 2040 ~ 2050 according to cost quantile in 2030 ~ 2040. Centered line in the box indicates the median.

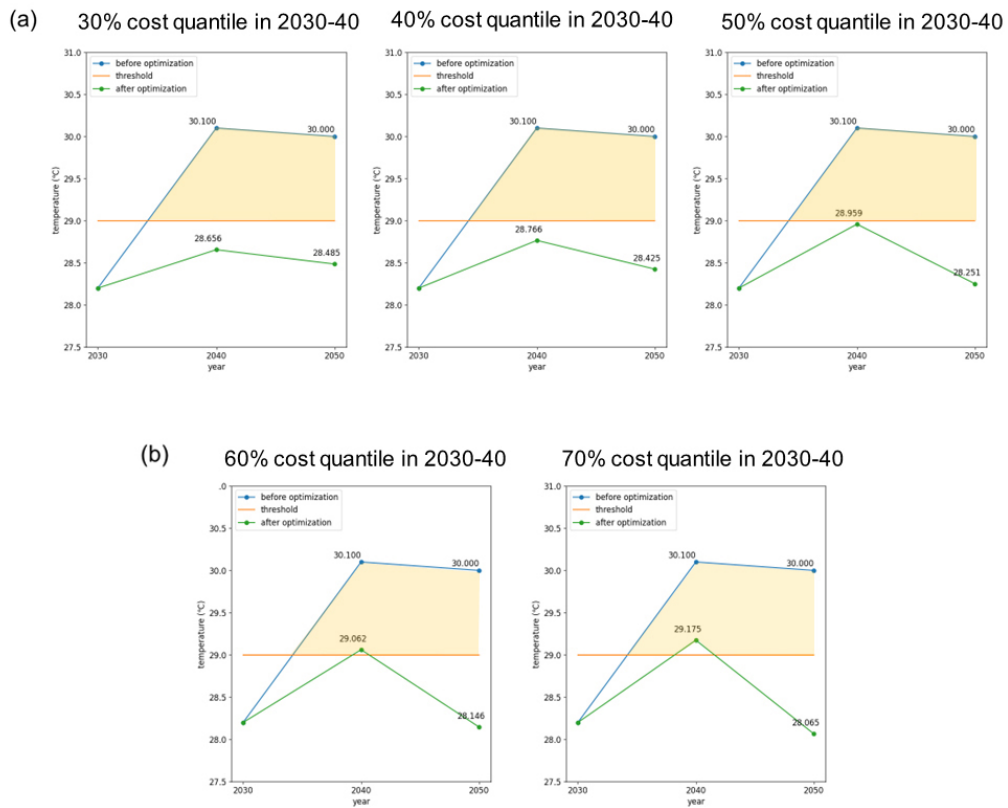


Fig. 7. Reduction area to threshold for each scenario. (a) indicates scenarios with a 100% goal achievement rate and (b) under 100% goal achievement rate: The ‘before optimization’ represents temperature values before the deployment of green infrastructure technologies, ‘after optimization’ represents temperature values after the deployment, and ‘threshold’ indicates the established critical value.

가지며 첫 번째 기간에 사용되는 비용이 높은 해일수록 파레토 프론트를 구성하는 최적해들의 비용 및 효과 범위가 좁아지는 경향이 나타났다. 이는 첫 번째 기간에 많은 비용을 투자하여 그린 인프라가 많은 공간에 다량 설치될수록, 두 번째 기간에는 설치 가능한 경우의 수가 감소하기 때문이다.

3.2. 기후변화 적응 관점에서 최적 시나리오의 결정

3.1에서 도출된 그린 인프라 시나리오들에 대하여 임계값까지의 저감 목표를 바탕으로 각 시나리오의 목표 달성률을 평가하였다. 첫 번째 기간 비용의 상위 30~50% 분위수 시나리오는 모든 시점에서 임계값 이하로의 저감에 성공하며 동일한 목표 달성률(100.00%)을 가졌다(Fig. 7a, Table 7). 60, 70% 분위수 시나리오는 2040년에 임계값 이하로의 저감에 실패하며 각각 99.70%, 97.80%의 목표 달성률을 가졌다(Fig. 7b, Table 7). 따라서 시나리오들 가운데 적어도 첫 번째 기간에 상위 50% 분위수 이하의 비용을 사용할 때 기후변화 적응 관점에서 유리했으며 이들 시나리오가 최적 시나리오로 결정되었다. 첫 번째 기간에 비용을 많이 사용하는 시나리오들은 초기부터 기온 저감 효과가 발생하는 장점과 동시에, 높은 유지비를 감당해야 하며 물가 상승으로 두 번째 기간에 설치 가능한 그린 인프라 수량이 더 적어진다는 단점을 갖는다. 본 결과에서는 장점이 단점을 상쇄하며 더 높은 효과를 발생시켜 첫 번째 기간에 사용되는 비용이 하위보다는 상위 분위수에 해당하는 시나리오들이 최적 시나리오로 결정된 것으로 보인다.

Table 7. Reduction area and goal achievement rate for each scenario

	30 ~ 50% scenario	60% scenario	70% scenario
Area	13.69	13.64	13.39
Goal achievement rate (%)	100.00	99.70	97.80

3.3. 그린 인프라의 시공간 계획안

모든 최적 시나리오에서 가로수가 가장 많이 설치되었고, 다음으로 옥상녹화가 높은 수량을 가졌으며, 띠녹지는 가장 적게 설치되었다. 이러한 수량의 위계는 첫 번째 기간과 두 번째 기간 모두에서 동일하였다(Fig. 8). 즉 주어진

예산 조건에서 대상지에 신규 그린 인프라 계획을 수립할 때, 2030~2050년의 전체 기간 동안 가로수, 옥상녹화, 띠녹지의 순으로 수량을 유지하는 것이 기후변화 적응 관점에서 유리하다. Hyun et al. (2021)은 유사하게 NSGA-II 최적화를 이용하여, 서울 전체를 대상으로 비용 대비 온열 질환자 수 감소가 효과적으로 감소하는 2100년까지의 적응 경로를 제시하였다. 가로수와 띠녹지를 포함한 6개의 적응 옵션에 대하여 파레토 프론트를 도출하였고, 파레토 프론트에 포함되는 적응 경로들에서 가로수는 ‘Greenway sidewalk’에 비해 2020~2050년 동안 높은 증가율을 가지며 그 수량 또한 전체 시기에서 높게 유지되는 경향을 보였다. 해당 결과는 가로수가 띠녹지보다 초반에 많은 수량이 설치되며 이러한 위계가 후반까지 유지되는 본 연구의 결과와 일관성을 가진다. 단 대상지의 크기에 있어 차이가 있으며, 본 연구는 서울 전체를 다룬 Hyun et al. (2021)에 비해 작은 블록 단위의 규모를 다룸으로써 지자체의 지구 단위 계획 수립에 기여하고자 하였다. Shi et al. (2023) 또한 다목적 최적화를 이용하여 사람들의 열 노출을 저감하는 적응 경로를 생성하는 모델을 제안하였다. 미국 ‘Baltimore’를 대상으로 도출된 적응 경로들에서는 건강 혜택의 최대화와 사망률 감소를 목표로 했을 때, 특히 나무는 빠른 시기에 설치하는 것이 좋다는 결론이 제시되었다. 이 또한 초기에 나무를 가장 높은 비율로 설치하는 본 연구의 결과와 유사하나, 본 연구는 그린 인프라의 종류를 옥상녹화와 띠녹지까지 더 세분화하여 고려함으로써 선행 연구의 결과를 보완할 수 있다.

Table 8에서 첫 번째 기간의 증가율은 수량과 마찬가지로 모든 시나리오에서 가로수가 1위, 옥상녹화가 2위, 띠녹지가 3위였다. 두 번째 기간의 증가율은 시나리오에 따라 그 순위가 상이했다. 30% 분위 시나리오에서는 띠녹지가 10년당 15%로 1위를, 40% 분위 시나리오에서는 가로수가 10년당 27%로 1위를, 50% 분위 시나리오에서는 옥상녹화가 10년당 30%로 1위를 차지하였다. 따라서 2030~2040년에는 대상지에 모든 기술을 49% 이상 식재하되 가로수, 옥상녹화, 띠녹지 순으로 높은 수량을 유지하도록 해야 하며, 2040~2050년에 어떤 기술의 증가율을 높일지에 따라 구체적인 시나리오와 시기별 수량 값이 결정된다. 장기적 관점에서 의사결정자의 여건에 맞는 시나리오를 선택하여 유연성 있는 계획을 수립할 수 있다.

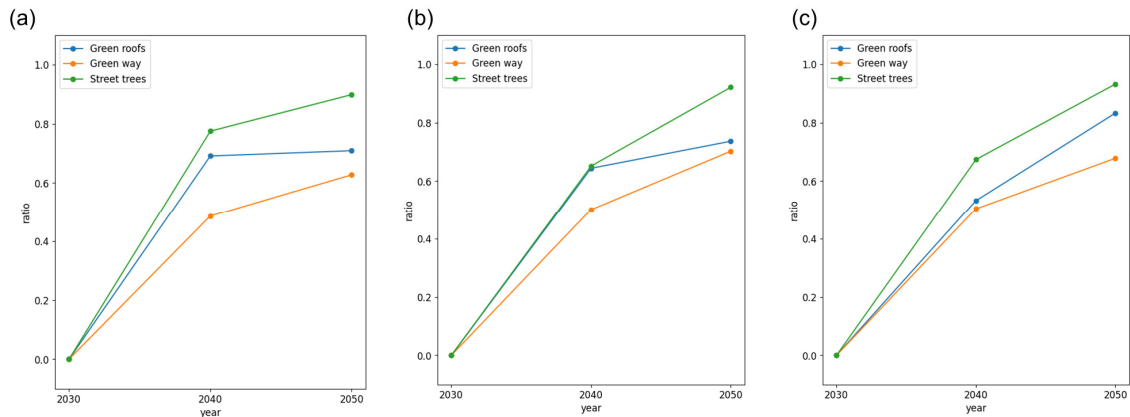


Fig. 8. Installation rate of green infrastructure over time in (a) 30% scenario, (b) 40% scenario, and (c) 50% scenario: The rate is expressed as the ratio of the total installed area of the technology to the available area for installation.

Table 8. Increase rate of each green infrastructure over time in 30% scenario, 40% scenario, and 50% scenario

Increase rate (%/decade)	30% scenario		40% scenario		50% scenario	
	2030 ~ 2040	2040 ~ 2050	2030 ~ 2040	2040 ~ 2050	2030 ~ 2040	2040 ~ 2050
Street trees	78	12	65	27	67	26
Green roofs	69	2	64	9	53	30
Green way	49	15	50	20	50	18

최종적으로 의사결정자는 시간적 측면에서 여건에 맞는 그린 인프라 배치 시나리오를 선택하여 그에 해당하는 공간 계획안까지 확인할 수 있다(Fig. 9). 최적 그린 인프라 시나리오의 각 기간을 구성하는 공간 계획안에서는, 첫 번째 기간에 들이는 비용이 작을수록 두 번째 기간에 그린 인프라가 설치되는 면적이 증가하는 경향이 나타났다. 이는 첫 번째 기간에 설치된 그린 인프라 수량이 적어서 유지 및 관리비 또한 덜 소모됨으로써 두 번째 기간에 신규 그린 인프라 설치에 더 많은 예산을 들일 수 있기 때문이다. 또한 띠녹지와 가로수 간의 시너지 효과를 강화하기 위해 대부분 띠녹지가 이미 설치된 지역에 가로수를 설치하는 양상이 보였다. Park et al. (2020)은 보행자의 열 환경을 개선시키기 위한 그린 인프라의 최적 조합을 모의했다. 해당 연구는 같은 수의 나무가 있을 때 주변에 'greenway'를 함께 설치할 때 비용 및 효과 면에서 효율적임을 보였으며, 이는 2040~2050년의 최적안에서 띠녹지와 나무가 대부분 함께 설치된 본 연구의 결과와도 일치한다.

3.4. 한계점 및 추후 연구에 대한 제언

추후 연구에서는 평가 방법의 고도화 및 실제 대상지에의 적용을 통해 의사결정 모델의 현실성을 높여야 한다. 본 연구는 그린 인프라가 없는 대상지를 가정하여 그린 인프라의 신규 조성 계획 지원을 목표로 하였다. 그러나 기존에 그린 인프라가 있는 대상지를 적용시킨다면 기존 그린 인프라의 효과를 고려하여 새로운 그린 인프라를 설치하는 계획안을 도출함으로써 이미 수행된 계획의 수정에 기여할 수 있을 것이다. 선행 연구 기반으로 설정된 효과 평가 모델을 기존 모의가 가능한 역학적 모델로 개선시켜, 그린 인프라의 효과에 영향을 미치는 건물 높이 등의 변수도 복합적으로 고려되어야 할 것이다. 그린 인프라는 식재 특성상 시간에 따라 성장을 하며, 성장함에 따라 기존 저감 효과도 달라진다(Rahman et al., 2015). 그러나 본 연구에서는 식재의 성장 효과가 고려되지 않았으므로 그린 인프라의 기존 저감 효과가 과소 혹은 과대평가되었을 우려가 있다. 또한 그린 인프라 기술의 비용 상승

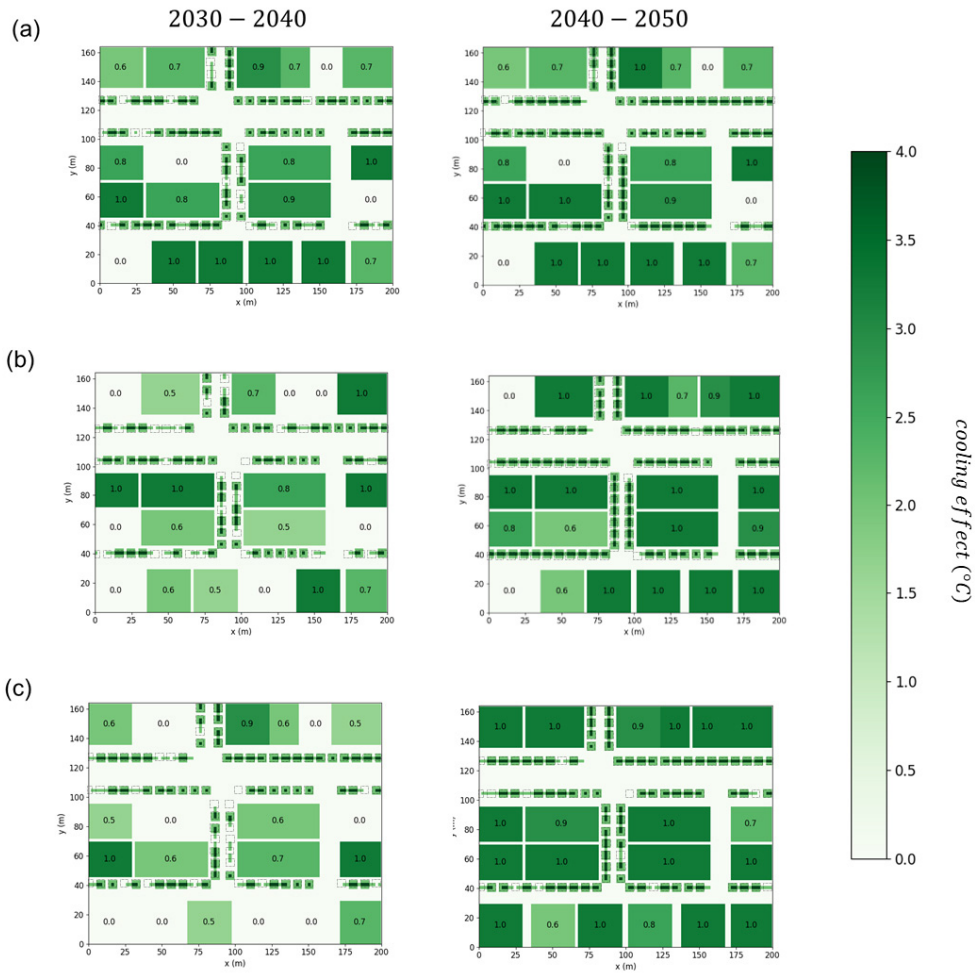


Fig. 9. Maps showing the temperature reduction effects of spatial plans: (a) 30% scenario, (b) 40% scenario, and (c) 50% scenario. The numbers in the green roof zones indicate the proportion of greening installed on the roof area. The dashed boxes represent the potential locations for street tree installations.

물이, 인건비 혹은 원자재비 등 각 기술을 구성하는 대표적인 요소로 통일되어 반영되었으므로, 세부적인 요소까지 고려될 경우 비용의 불확실성을 줄일 수 있을 것이다. 그린 인프라 시나리오의 기후변화 적응 역량 평가를 위해 설정된 임계값 또한 실제 대상지의 기후적 특성이 고려된 값으로 새롭게 연구되어야 할 것이다. 현재 기후변화로 인한 고온 현상에 대한 적응을 다루고 있으나 홍수나 한파 등의 재해를 통합시키면 복합적인 재해에 대한 의사결정 지원이 가능할 것이다.

4. 결론

본 연구는 기존 녹지가 없는 가상 대상지를 가정하여 기온 저감 효과 최대와 비용 최소를 목적으로 하는 최적화를 2030~2040년과 2040~2050년의 두 시기에 대해 진행하였다. 그 과정에서 시간에 따른 기온 상승(RCP 4.5)과 그린 인프라의 유지 및 설치비가 고려되었다. 최적화를 통해 구성된 그린 인프라 시나리오 중 의사결정자가 입력하는 비용 조건을 만족하는 시나리오만 우선 선별되었다. 비용으로 선별된 시나리오들에 대하여 임계값을 기준으로 시나리오 적용 전후의 저감량을 계산하여, 저감량이 최댓

값을 가지는 시나리오들이 최적 그린 인프라 시나리오로서 최종 결정되었다. 이러한 시나리오들은 2030~2040년의 파레토 프론트 중 비용이 상위 50% 분위 이내에 드는 시나리오였으므로, 초반 시기에 비용을 어느 정도 이상 사용하는 것이 기후변화 적응에 유리함을 시사하였다. 최적 그린 인프라 시나리오의 결과를 통해 2030~2050년 기간에 대한 그린 인프라 기술의 시기별 최적 수량을 도출하였다. 그 결과 2030~2040년에 모든 기술이 각 설치 가능 면적의 49% 이상 설치되면서, 전체 기간을 통틀어 가로수-옥상녹화-떡잎지 순으로 높은 수량을 가졌다. 2030~2040년의 초반 기간에 가장 증가율이 높은 것은 가로수였고, 2040~2050년의 후반 기간 증가율은 시나리오에 따라 기술의 순위가 상이하였다. 마지막으로 시간대 따른 기술 수량을 공간적으로 배치하는 계획안을 도출함으로써 시간 간 관점이 통합될 가능성을 제시하였다.

따라서 의사 결정자는 유동적인 기후변화 시나리오와 그린 인프라 기술의 유지 및 관리비가 고려된 맥락에서, 원하는 비용 조건을 만족하며 기후변화 적응에 효과적인 그린 인프라 계획안을 마련할 수 있다. 특히 기후변화는 거시적이고 장기적인 문제로 기후변화의 불확실성을 고려한 장기적인 관점에서의 의사 결정이 필요하나, 기존 선행 연구들은 그린 인프라를 시간적 측면에서 장기적으로 다루기보다는 단일 시점의 공간적 측면에서 다루는 것에 집중되어 있었다. 본 연구의 결과는 기존 연구의 한계점을 보완하며, 장기적 관점에서 기후변화 적응을 위한 지구 단위의 그린 인프라의 신규 조성 계획에 기여할 것으로 보인다. 특히 현재 1년 단위의 단기적 관점에서 예산이 책정되고 있는 실정에서, 더 장기적인 20년의 예산 규모를 통해 시기별로 필요한 예산 및 필요 수량을 역으로 도출함으로써 그린 인프라 계획의 효율성을 높일 수 있는 가능성을 제시하였다. 추후 기존에 식재된 그린 인프라를 고려하거나 다루는 재난의 범위를 넓힘으로써 다양한 계획에 범용성 있게 활용될 수 있을 것이다.

사사

본 성과는 환경부의 재원을 지원받아 한국환경산업기술원 “신기후체제대응환경기술개발사업”의 연구개발을 통해 창출되었습니다(RS-2022-KE002102).

Reference

- Amani-Beni M, Zhang B, Xie G, Xu J. 2018. Impact of urban park's tree, grass and waterbody on microclimate in hot summer days: A case study of Olympic Park in Beijing, China. *Urban For Urban Green* 32: 1-6. doi: 10.1016/j.ufug.2018.03.016
- Beckmann SK, Hiete M, Beck C. 2021. Threshold temperatures for subjective heat stress in urban apartments—Analysing nocturnal bedroom temperatures during a heat wave in Germany. *Clim Risk Manag* 32: 100286. doi: 10.1016/j.crm.2021.100286
- Carvalho D, Martins H, Marta-Almeida M, Rocha A, Borrego C. 2017. Urban resilience to future urban heat waves under a climate change scenario: A case study for Porto urban area (Portugal). *Urban Clim* 19: 1-27. doi: 10.1016/j.uclim.2016.11.005
- Chen Y, Zheng B, Hu Y. 2020. Numerical simulation of local climate zone cooling achieved through modification of trees, albedo and green roofs—A case study of Changsha, China. *Sustainability* 12(7): 2752. doi: 10.3390/su12072752
- Deb K, Pratap A, Agarwal S, Meyarivan T. 2002. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Trans Evol Comput* 6(2): 182-197. doi: 10.1109/4235.996017
- Fu J, Dupre K, Tavares S, King D, Banhalimi-Zakar Z. 2022. Optimized greenery configuration to mitigate urban heat: A decade systematic review. *Front Archit Res* 11(3): 466-491. doi: 10.1016/j.foar.2021.12.005
- Green D, O'Donnell E, Johnson M, Slater L, Thorne C, Zheng S, Stirling R, Chan FKS, Li L, Boothroyd RJ. 2021. Green infrastructure: The future of urban flood risk management? *Wiley Interdiscip Rev Water* 8(6): e1560. doi: 10.1002/wat2.1560
- Ham YY, Jang HJ. 2023. A numerical study on the optimization of combustion performance in dual fuel RCCI engine using NSGA-II (in Korean with English abstract). *J Korean Soc Ind Appl Sci* 24(10): 150-156. doi: 10.5762/KAIS.2023.24.10.150

- Huang Y, Tian Z, Ke Q, Liu J, Irannezhad M, Fan D, Sun L. 2020. Nature-based solutions for urban pluvial flood risk management. *Wiley Interdiscip Rev Water* 7(3): e1421. doi: 10.1002/wat2.1421
- Hyun JH, Kim JY, Park CY, Lee DK. 2021. Modeling decision-maker preferences for long-term climate adaptation planning using a pathways approach. *Sci Total Environ* 772: 145335. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145335
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2022. Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press. doi: 10.1017/9781009325844
- KDCA (Korea Disease Control and Prevention Agency). 2023. Heat-related illnesses surge during heatwaves, with 20.4% of cases occurring in individuals aged 70 and older. [accessed 2024 Aug 12]. https://www.kdca.go.kr/board/board.es?mid=a2050101000&bid=0015&list_no=723193&cg_code=&act=view&nPage=1
- KFS (Korea Forest Service). 2020. Roadside tree creation management manual. Daejeon, Korea: KFS. 11-1400000-000827-14.
- KICT (Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology). 2024. Construction cost index.
- Kim JY, Park CY, Hyun JH, Kim SH, Lee DK, Kim JY. 2023. Landscape design for improved thermal environment: An optimized tree arrangement design for climate-responsive outdoor spaces in residential buildings complexes. *Sustain Cities Soc* 97: 104762. doi: 10.1016/j.scs.2023.104762
- Kim SH, Song MJ, Yun SH, Lee DK. 2024. Analysis of optimal index for heat morbidity (in Korean with English abstract). *J Environ Impact Assess* 33(1):9-17. doi: 10.14249/eia.2024.33.1.9
- KMA (Korea Meteorological Administration). 2024. The number of heatwave days. [accessed 2024 Aug 12]. <https://data.kma.go.kr/climate/heatWave/selectHeatWaveC> hart.do
- KREI (Korea Rural Economic Institute). 2023. Landscaping tree observation monthly report: December 2023 issue.
- Kwon HS, Kim JG, Lee BS, Kim JH, Kim MH, Kim NS. 2014. Architectural design guidelines for diffusion of green roof. Daejeon, Korea: Land & Housing Research Institute. Research Support No. 2014-44.
- Lin BS, Lin CT. 2016. Preliminary study of the influence of the spatial arrangement of urban parks on local temperature reduction. *Urban For Urban Green* 20: 348-357. doi: 10.1016/j.ufug.2016.10.003
- Lin W, Yu T, Chang X, Wu W, Zhang Y. 2015. Calculating cooling extents of green parks using remote sensing: Method and test. *Landsc Urban Plan* 134: 66-75. doi: 10.1016/j.landurbplan.2014.10.012
- Liu Y, Hoppe BO, Convertino M. 2018. Threshold evaluation of emergency risk communication for health risks related to hazardous ambient temperature. *Risk Anal* 38(10): 2208-2221. doi: 10.1111/risa.12998
- Manso M, Teotónio I, Silva CM, Cruz CO. 2021. Green roof and green wall benefits and costs: A review of the quantitative evidence. *Renew Sustain Energy Rev* 135: 110111. doi: 10.1016/j.rser.2020.110111
- Marando F, Salvatori E, Sebastiani A, Fusaro L, Manes F. 2019. Regulating ecosystem services and green infrastructure: Assessment of urban heat island effect mitigation in the municipality of Rome, Italy. *Ecol Model* 392: 92-102. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2018.11.011
- McLean KE, Stranberg R, MacDonald M, Richardson GR, Kosatsky T, Henderson SB. 2018. Establishing heat alert thresholds for the varied climatic regions of British Columbia, Canada. *Int J Environ Res Public Health* 15(9): 2048. doi: 10.3390/ijerph15092048
- Montalto FA, Bartrand TA, Waldman AM, Travaline KA, Loomis CH, McAfee C, Geldi JM, Riggall GJ, Boles LM. 2013. Decentralised green infrastructure: The importance of stakeholder behaviour in determining spatial and temporal outcomes. *Struct Infrastruct Eng*

- 9(12): 1187-1205. doi: 10.1080/15732479.2012.671834
- MWC (Minimum Wage Commission). 2023. Wage survey report.
- Ng E, Chen L, Wang Y, Yuan C. 2012. A study on the cooling effects of greening in a high-density city: An experience from Hong Kong. *Build Environ* 47: 256-271. doi: 10.1016/j.buildenv.2011.07.014
- NIFoS (National Institute of Forest Science). 2022. 6 tips for zoysiagrass management.
- Park CY, Yoon EJ, Lee DK, Thorne JH. 2020. Integrating four radiant heat load mitigation strategies is an efficient intervention to improve human health in urban environments. *Sci Total Environ* 698: 134259. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134259
- Rahman MA, Armson D, Ennos AR. 2015. A comparison of the growth and cooling effectiveness of five commonly planted urban tree species. *Urban Ecosyst* 18: 371-389. doi: 10.1007/s11252-014-0407-7
- Seoul Metropolitan Government. 2017. Guidelines for rooftop greening in Seoul.
- Sharifi A. 2021. Co-benefits and synergies between urban climate change mitigation and adaptation measures: A literature review. *Sci Total Environ* 750: 141642. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141642
- Shi R, Hobbs BF, Quinn JD, Lempert R, Knopman D. 2023. City-Heat Equity Adaptation Tool (City-HEAT): Multi-objective optimization of environmental modifications and human heat exposure reductions for urban heat adaptation under uncertainty. *Environ Model Softw* 160: 105607. doi: 10.1016/j.envsoft.2022.105607
- Tomlinson CJ, Chapman L, Thornes JE, Baker CJ. 2011. Including the urban heat island in spatial heat health risk assessment strategies: A case study for Birmingham, UK. *Int J Health Geogr* 10: 42. doi: 10.1186/1476-072X-10-42
- Varentsov M, Vasenev V, Dvornikov Y, Samsonov T, Klimanova O. 2023. Does size matter? Modelling the cooling effect of green infrastructures in a megacity during a heat wave. *Sci Total Environ* 902: 165966. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.165966
- Wang M, Liu M, Zhang D, Qi J, Fu W, Zhang Y, Rao Q, Bakhshipour AE, Tan SK. 2023. Assessing and optimizing the hydrological performance of grey-green infrastructure systems in response to climate change and non-stationary time series. *Water Res* 232: 119720. doi: 10.1016/j.watres.2023.119720
- Wong NH, Tan CL, Kolokotsa DD, Takebayashi H. 2021. Greenery as a mitigation and adaptation strategy to urban heat. *Nat Rev Earth Environ* 2(3): 166-181. doi: 10.1038/s43017-020-00129-5
- Yang L, Qian F, Song DX, Zheng KJ. 2016. Research on urban heat-island effect. *Procedia Eng* 169: 11-18. doi: 10.1016/j.proeng.2016.10.002
- Yoon EJ, Kim B, Lee DK. 2019. Multi-objective planning model for urban greening based on optimization algorithms. *Urban For Urban Green* 40: 183-194. doi: 10.1016/j.ufug.2019.01.004
- Zölch T, Maderspacher J, Wamsler C, Pauleit S. 2016. Using green infrastructure for urban climate-proofing: An evaluation of heat mitigation measures at the micro-scale. *Urban For Urban Green* 20: 305-316. doi: 10.1016/j.ufug.2016.09.011